干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

内蒙古托克托县“神泉”水文地球化学特征及成因研究

王 磊， 董少刚， 王雪欣， 王 超， 李政葵
（内蒙古大学生态与环境学院，内蒙古自治区河流与湖泊生态重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010021）

摘 要：内蒙古托克托县地下水普遍高氟、高盐，大部分不适合长期饮用，而位于县城西南的“神泉”，却因优良的水质成为该区域人民生活的主要水源。为了探寻“神泉”水的来源及其与周边地下水化学特征不同的原因，通过收集水文地质资料、实地踏勘及取样分析的基础上，利用Piper三线图法、Durov图法、地下水流动系统分析等方法对该泉水以及周边地下水进行对比分析并追溯其来源。结果表明：(1)“神泉”虽处于托克托县境内冲湖积平原排泄区并紧邻黄河，但其水质低氟高锶(HCO_3-Ca型水)与黄河水(Cl-Na型水)及周边地下水(高氟、高TDS)有本质的不同。(2)“神泉”水与黄河水及周边地下水无明显的水力联系，其主要是由库布齐沙漠区地下水通过鄂尔多斯北缘断层，经由黄河河床淤泥下伏断裂通道补给形成，属于典型的断层泉。

关键词：神泉；断层；地下水；水文地球化学；托克托县；内蒙古

泉是地下水的天然露头，在地形面与含水层或含水通道相交点地下水出露成泉[1]。作为地下水的主要排泄形式之一，泉在人类的生产生活中有着极为重要的作用。但近些年来，这些泉相继出现了流量减少、水质恶化，甚至断流等情况[2-4]。

影响泉流量及水质的因素很多，一般可以分为自然因素和人为因素，自然因素主要包括：补给源、地质构造、径流条件、围岩特征等[5-8]；人为因素主要包括地下水开采、矿业开采等[9-10]。如，济南泉泉群主要由千佛山大气降水补给，在人为开采、污废水不合理排放的干预下出现了水量短缺和水化学指标的持续升高的问题[11]。赵芹珍等[12]对太原市晋祠泉的研究发现，晋祠泉的断流与人类活动导致的汾河水位下降有很大关系，近年来，随着汾河水库的建成，汾河水位抬升，晋祠泉自然复流[13]。郭永彬等[14]调查发现，过度开采地下水及采矿业的疏干排水导致地下水位大幅下降，使娘子关泉出现涌水量减少的问题，同时，当地黄铁矿开采也导致泉水中SO_4^{2-}浓度的超标。除了人类开采活动外，地下水循环过程中的溶滤作用也是影响地下水中化学成分最主要的原因之一[15-16]。

Makoba等[17]发现，坦桑尼亚北部梅鲁山侧的泉水与其他井水相比，具有水岩相互作用时间短的特点，进一步研究发现与断裂有关。Harkness等[18]在南非卡罗盆地发现有一泉水水质与周围浅水及承压水水质均完全不同，分析其原因是碳酸盐岩在侵入过程中产生导水断裂使得地壳深部地下水补给泉水。Kouadra等[19]根据稳定氢氧同位素资料研究得出，大气降水通过碳酸盐岩形成的导水断层流动，可以从较高的海拔远程补给泉水。另外，考虑到地下水沿流动路径发生的水文地球化学过程的重要性，Kim等[20]研究发现，含水层的地球化学过程对Sr同位素和Sr含量分布有重要影响。

内蒙古托克托县气候干旱，除黄河外无常年地表径流，作为主要工农业及生活用水的地下水又普遍高氟、高盐[21]，水资源极其匮乏。托克托县“神泉”水质却具有低氟、低盐的优点，为当地居民提供了重要的生活用水。作为呼和浩特市为数不多且具有重要旅游及饮用价值的泉水资源，探讨其与周边地下水水质差异原因，厘清其形成机制对保护及可持续开发具有重要意义。

收稿日期：2019-11-12；　**修订日期：**2020-03-18
基金项目：内蒙古自治区自然科学基金项目(2018MS04004)；内蒙古“一湖两海”科技重大专项项目；国家自然科学基金项目(41562020)共同资助
作者简介：王磊(1994-)，男，硕士研究生，研究方向为水文地质学. E-mail: ayqwyl@163.com
通讯作者：董少刚. E-mail: groundwater@163.com

1　研究区概况

"神泉"位于内蒙古呼和浩特市托克托县西南大黑河冲积平原南缘，隔黄河与库布齐沙漠相望（图1）。该区属温带大陆性季风气候，降水少，蒸发量大，多年平均降水量及蒸发量分别为359.5 mm、1935.4 mm，降水集中在7—9月，占全年总降水量65%，年平均气温6.2 ℃。

从区域水文地质背景的角度看，"神泉"处于大黑河冲湖积平原与托克托湖积台地结合部的区域地下水的排泄区（图1）。"神泉"东部的湖积台地区潜水含水层主要由中更新统粉细砂、砂黏土等构成；承压水主要赋存于白垩系砂岩和碎屑岩中。大黑河冲积平原区潜水含水层主要由上更新统至全新统河湖交互沉积层组成，岩性主要为砂砾石、亚砂土、粉土与淤泥互层；承压水主要赋存于第四系中更新统下岩段砂及砂砾石层（Q_2）；黄河对岸库布齐沙漠区潜水含水层主要为第四纪全新统风积沙及下伏白垩系砂岩构成。区内地下水的补给途径主要有降水入渗补给、山前侧向补给及丰水期的黄河水补给。

2　水样采集及分析

采样点包含"神泉"、正在使用的水井（包括库布齐沙漠内的两口井）及黄河水，共32个采样点（图1）。每个采样点用GPS进行定位；井深通过咨询调查获得，潜水井深为6~40 m，承压水井深40~200 m；采样时间为2016年7月。参照《中华人民共和国环境保护行业标准—地下水环境监测技术规范》（HJ/T 164-2004）对水样进行采集和分析。在现场使用便携式pH仪测量水样pH，氧化还原电位仪测量水样Eh，不间断抽水待数据稳定后记录数值并采集

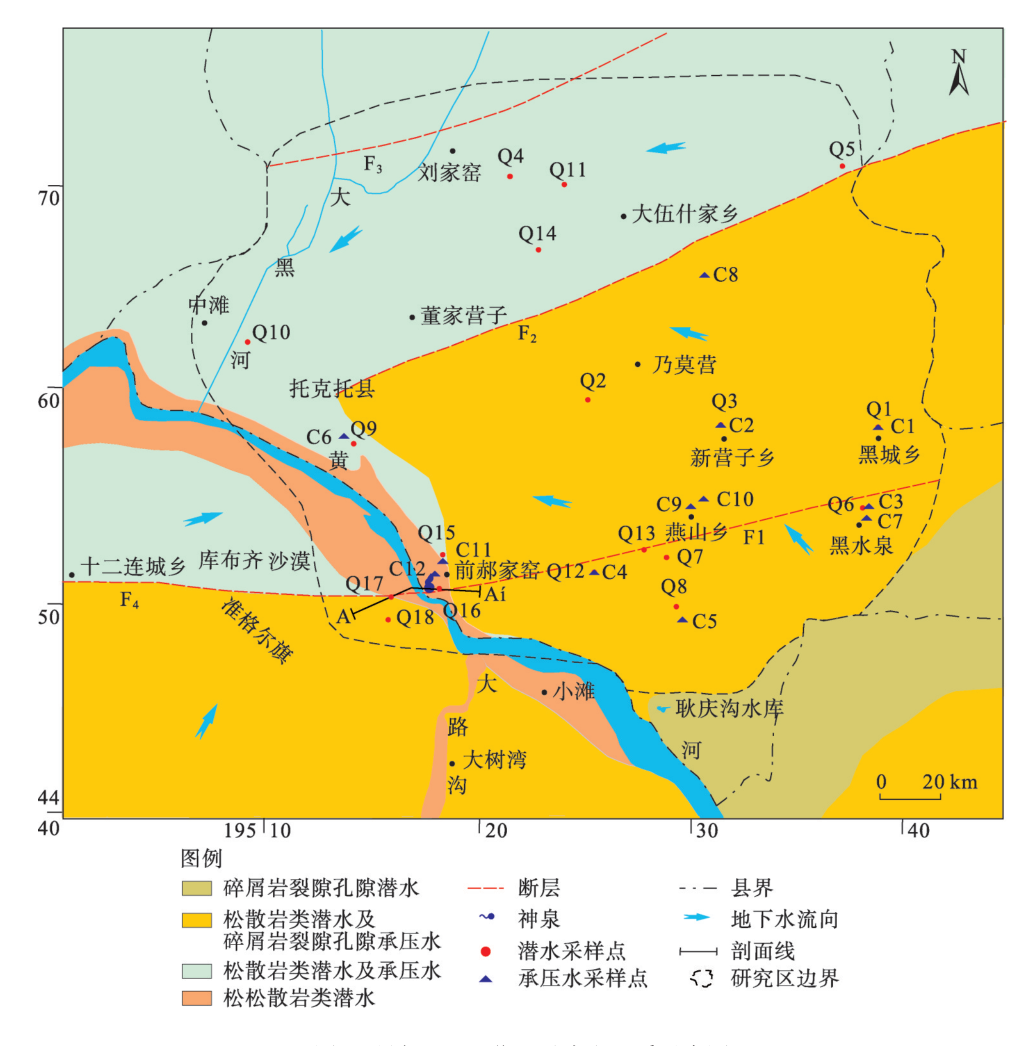


图1　研究区地理位置及水文地质示意图

Fig. 1　Geographical location and hydrogeological map of the study area

水样。

所采水样首先使用0.45 μm的滤膜过滤，并用预先清洗且灭菌的5 L聚乙烯瓶收集，在取样前用取样水冲洗1次，其中一部分样品用体积比为1%的盐酸酸化[22]。水样密封后于24 h内运回实验室，储存于0~4 ℃的环境中，并确保在48 h内完成测定。TDS用重量法测定；COD用高锰酸钾氧化法测定；HCO_3^-含量用酸碱滴定法滴定测出；酸化水样中的可溶性金属K^+、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、和As利用电感耦合等离子体质谱法分析。未经酸化水样中的Cl^-、SO_4^{2-}、F^-和Sr利用离子色谱仪检测。对测得的数据应用离子平衡和质量平衡进行检验，结果显示离子平衡检验误差均在3%以内，质量平衡检验误差均在5%以内。

3 结果与讨论

3.1 "神泉"及周边地下水化学基本特征

由表1可知，"神泉"水pH为7.8，黄河水pH为8.6，潜水和承压水平均pH均为7.9，呈弱碱性。"神泉"水TDS为276.0 mg·L^{-1}，库布齐沙漠中的两口井TDS分别为232.0 mg·L^{-1}和238.0 mg·L^{-1}，其余水样TDS均大于400.0 mg·L^{-1}，"神泉"水TDS远低于其他水样。"神泉"和沙漠中潜水的宏量离子的质量浓度(mg·L^{-1})排序为阳离子：$Na^+>Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^+$，阴离子：$HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$；黄河水的宏量离子的质量浓度(mg·L^{-1})排序为阳离子：$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$，阴离子：$SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^-$；潜水的宏量离子的平均质量浓度(mg·L^{-1})的排序为阳离子：$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$，阴离子：$HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$；承压水的宏量离子的平均质量浓度(mg·L^{-1})排序为阳离子：$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$，阴离子：$HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$。区域潜水和承压水中最高氟含量分别为7.2 mg·L^{-1}、11.2 mg·L^{-1}，此地高氟水(>1 mg·L^{-1})广泛分布。

另外，由于"神泉"水的富锶特征，对"神泉"水、黄河水及其周边的6个水样的锶含量进行了检测。由表2可以看出，黄河水和托克托县境内潜水的锶含量达到1.0 mg·L^{-1}以上，承压水的锶含量不足0.3 mg·L^{-1}，"神泉"水与沙地井水的锶含量在0.5~0.6 mg·L^{-1}。

地下水中锶的主要来源是大气降水输入和含锶矿物的溶解[23]，且锶有很好的迁移特性，易从岩石中浸出[24]。孙厚云等[25]发现，富锶泉水在碳酸盐岩、花岗岩体(花岗岩基质变质岩)、玄武岩、粗安岩各种凝灰质火山碎屑岩中均有出露，多与断裂结构有关。"神泉"水中锶含量不同于周边其他水样。黄河水和托克托县境内潜水锶含量达到1.0 mg·L^{-1}，这与二者强烈的蒸发浓缩作用有关。承压水的平均锶含量不足0.3 mg·L^{-1}，证明其循环过程中无富锶矿物的大量溶解。从补径排条件来看，"神泉"与其周围的C11、C12、Q15、Q16之间锶含量差异较大。

3.2 "神泉"周边高氟水成因分析

新近纪中—晚新世以来，托克托县东部蛮汉山至少经历了4次玄武岩喷发，致使大量氟化物进入土壤及地表岩层[26]；北部大青山和东部蛮汉山区广

表1 水样指标统计分析

Tab. 1 Statistical analysis of water sample indicators

指标		pH	TDS	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	F^-	As
							/(mg·L^{-1})					
神泉水		7.8	276.0	2.6	39.9	33.1	19.0	6.8	52.9	237.9	–	–
黄河水		8.6	1124.0	10.1	260.0	45.3	59.1	238.0	332.0	207.4	0.7	1.2
沙地井	平均值	7.8	235.0	2.5	33.5	35.5	22.0	4.1	45.2	251.1	–	–
潜水	最大值	8.4	3424.0	131.4	1785.0	147.6	444.5	1044.0	782.0	750.3	7.2	25.7
	最小值	7.4	232.0	2.1	32.0	19.2	21.0	3.5	35.0	245.9	–	–
	平均值	7.9	1367.9	18.4	364.5	60.2	112.4	287.0	248.8	434.5	2.3	4.8
	标准偏差	0.3	914.3	31.2	396.8	37.2	102.7	265.8	201.6	136.5	1.9	7.0
承压水	最大值	8.6	2089.0	17.6	493.9	93.5	86.0	634.0	612.0	464.9	11.2	2.2
	最小值	7.5	426.0	1.4	121.5	10.2	2.2	23.4	59.2	153.8	–	–
	平均值	7.9	992.0	4.5	282.9	35.3	35.8	206.2	237.6	315.9	2.3	0.9
	标准偏差	0.3	495.6	4.3	125.9	26.2	28.3	177.6	150.7	102.3	2.9	0.6

注：–表示未达到检出限。

表2　采样点锶含量统计分析

Tab. 2　Statistical analysis of strontium content around "Shenquan"

样点	神泉	黄河水	Q15	Q16	C11	C12	Q17	Q18
Sr/(mg·L^{-1})	0.5	1.2	1.5	1.6	0.3	0.2	0.6	0.6

泛分布的片麻岩和花岗岩富含角闪石、黑云母等富氟矿物,这些矿物在风化、降水淋溶作用下产生的氟也向湖积台地和平原区迁移,这为该区高氟水的形成提供了物质来源[21,26]。

由表3可知,承压水中F^-浓度与pH、HCO_3^-呈明显的正相关关系,而与Ca^{2+}呈负相关关系。该区地下水中氟化物的浓度受碳酸盐岩(如方解石、白云石)和CaF_2溶解—沉淀平衡控制,当地下水中Ca^{2+}浓度高时F^-容易生成CaF_2沉淀[21,27]。由于碳酸岩盐的溶解度远远小于CaF_2,随着地下水pH升高碳酸岩盐的溶解度降低,地下水中Ca^{2+}的浓度减少,这促进了CaF_2溶解,有利于F^-的富集(公式1、2)。

$$Ca^{2+}+HCO_3^-=CaCO_3\downarrow+CO_2\uparrow+H_2O \quad (1)$$

$$CaF_2=Ca^{2+}+2F^- \quad (2)$$

从区域地下水流动特征来看,湖积台地承压水因含水层渗透性差,地下水径流缓慢而导致氟含量较高。"神泉"所处的平原区域属于潜水排泄区,地下水位埋深浅(在0.5~6 m),强烈的蒸发浓缩作用进一步促进了氟化物的富集。

表3　Ca^{2+}, HCO_3^-及pH和F^-的相关性分析

Tab. 3　Correlation analysis of Ca^{2+}, HCO_3^-, pH and F^-

指标	$F^-_{(潜水)}$	$F^-_{(承压水)}$
Ca^{2+}	−0.54*	−0.45
HCO_3^-	−0.16	0.72*
pH	0.18	0.89**

注:**在0.01水平上显著相关; * 在0.05水平上显著相关。

3.3 "神泉"水来源分析

3.3.1 水化学类型分析　利用Piper三线图对采集的水样的水化学特征进行分类。由图2可以看出,"神泉"水样为HCO_3–Ca(Ⅰ)型水,而黄河水样为Cl–Na(Ⅱ)型水;承压水样9个属于Cl–Na(Ⅱ)型水,3个属于混合HCO_3–Ca·Na(Ⅲ)型水,因此"神泉"水不是来自该区承压水或黄河水的补给。

从图2b可以看出,泉水与潜水民井(Q15、Q16)的水样类型基本相同;但是依据Durov图(图3)可以看出,Q15、Q16与"神泉"水的TDS存在较大差异,且数据表明Q15存在氟超标的现象,Q16的砷含量是其他点的10倍以上。根据区域水文地质条件,"神泉"更接近冲湖积平原的扇缘,属于各元素富集区,此种水成分分布特征证明Q15、Q16和"神泉"水并非同一水源。黄河对岸位于库布齐沙漠的两口沙地井Q17、Q18的水质指标与"神泉"水表现出高度的一致性,因此"神泉"水与这两口沙地井可能为同一水源。

3.3.2 水文地质条件分析　对比发现,位于黄河对岸的库布齐沙漠两口沙地井成分与"神泉"水化学成分非常相似(表1)。沙漠中的砂粒粗大,降水可以快速的下渗,而这些粗大沙粒向上吸水能力非常弱,所以绝大多数水被保存于沙土之下,进而补充到潜水含水层,因而沙漠看似干燥,实则水资源丰富[28]。库布齐沙漠潜水由上覆沙丘孔隙潜水和下

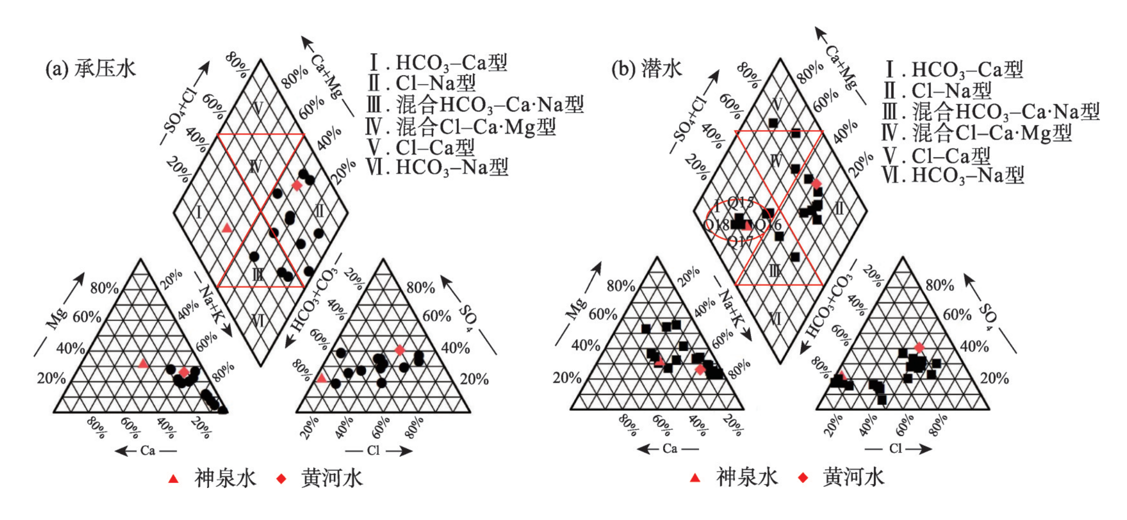


图2　采样点地下水化学分析Piper三线图

Fig. 2　Piper diagram of groundwater chemical analysis at sampling points

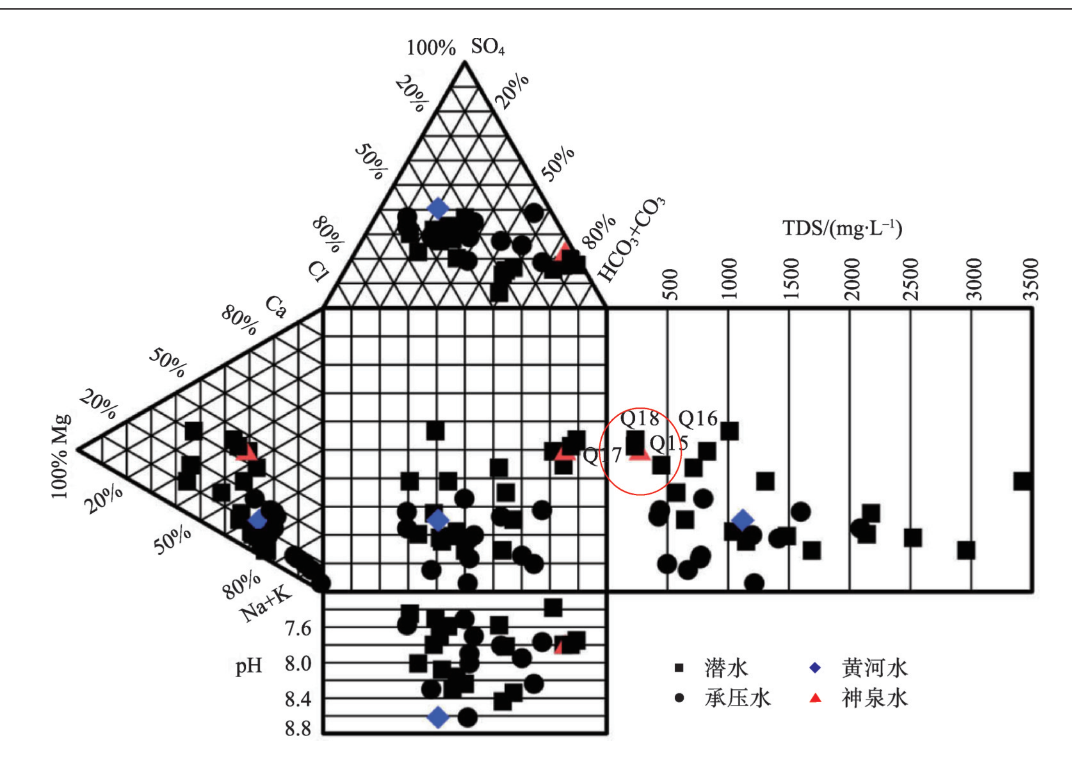


图3 地下水水化学类型Durov图

Fig. 3 Durov diagram of groundwater hydrochemical types

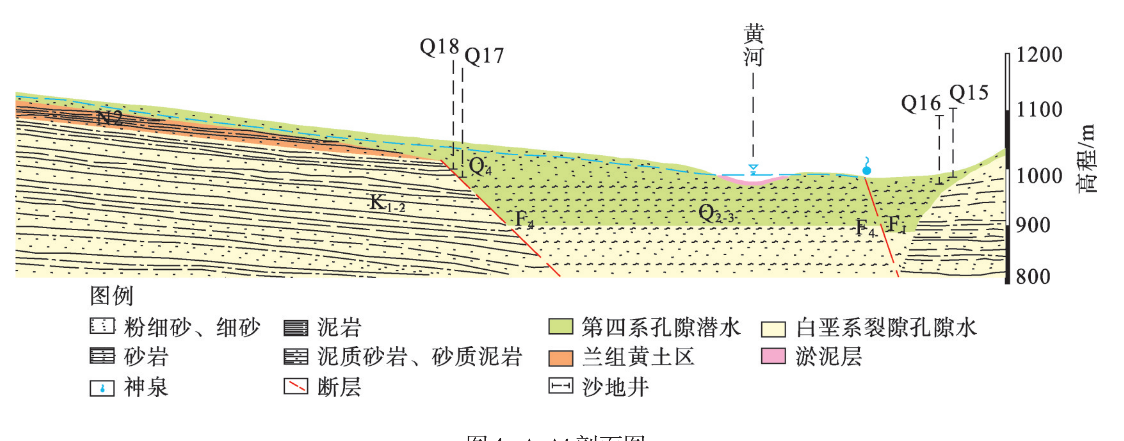


图4 A-A′剖面图

Fig. 4 A-A′ profile

部巨厚的白垩系碎屑岩孔隙—裂隙潜水构成，由于两者间没有稳定的隔水层，因此具有统一的水力联系（图4，图5）。根据调查，黄河对岸库布齐沙漠有断层存在，即鄂尔多斯北缘断层[29]，其呈东西走向（F_4），西高东低，断层穿越黄河与托克托县的F_1断层相交（图1）。“神泉”处于F_1、F_4断层的相交处，由于黄河底部淤泥将断层上部封闭，阻断了黄河水与断层中的地下水的水力联系，形成地下水径流通道，使沙漠中的潜水可以直接补给“神泉”区（图4，图5），并在两条断层相交处出露成泉。

4 结 论

（1）托克托县因其特殊的水文地质环境普遍存在高氟、高盐水，而“神泉”水水质优良，属低TDS的HCO_3- Ca型水。

（2）托克托“神泉”属于断层泉，是由鄂尔多斯北缘断层形成的径流通道穿越黄河，把库布齐沙漠中的潜水输送到黄河对岸出露成泉，因此“神泉”水与库布齐沙漠地下水属于同一水源，具有相似的水化学特征。

图例
潜水位　砾岩　砂岩　流线　断层
承压水位　隔水层　神泉　黄河　隔水边界

图5　沿断层地下水流场图

Fig. 5　Groundwater dynamic field along fault

参考文献(References)：

[1] 张人权. 水文地质学基础[M]. 第7版. 北京: 地质出版社, 2018: 79−81. [Zhang Renquan. Fundamentals of Hydrogeology [M]. 7th Ed. Beijing: Geological Publishing House, 2018: 79−81.]

[2] 梁永平, 王维泰, 赵春红, 等. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. 中国岩溶, 2013, 32(1): 34−42. [Liang Yongping, Wang Weitai, Zhao Chunhong, et al. Variations of karst water and environmental problems in North China[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(1): 34−42.]

[3] 虞慧, 莫美仙, 庞君, 等. 云南省威信县李子埂煤矿突水与龙洞坝泉断流原因分析[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(1): 102−105. [Yu Hui, Mo Meixian, Pang Jun, et al. Cause analysis on water inrush in Lizigeng coal mine and Longdongba spring cut-off in Weixin County of Yunnan Province[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2014, 41(1): 102−105.]

[4] 苗晋祥, 汤小姝, 吴继臣, 等. 百泉断流解决途径的研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, 31(6): 744−748. [Miao Jinxiang, Tang Xiaomei, Wu Jichen, et al. Study on the solution to discontinuous flow of Baiquan spring region[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science Edition), 2012, 31(6): 744−748.]

[5] Tazioli A, Conversini P, Peccerillo A. Hydrogeological and geochemical characterisation of the Rock of Orvieto[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(1): 55−65.

[6] 王海宁, 乔光建. 涞源岩溶地下水系统泉水量变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 54−57, 68. [Wang Haining, Qiao Guangjian. Variations of spring volume of the Karst groundwater system in the Laiyuan Region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 54−57, 68.]

[7] 任孝宗, 李建刚, 刘敏, 等. 浑善达克沙地东部地区天然水体的水化学组成及其控制因素[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 791−800. [Ren Xiaozong, Li Jiangang, Liu Min, et al. Hydrochemical composition of natural waters and its affecting factors in the East Hunshandak Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 791−800.]

[8] López-Chicano M, Bouamama M, Vallejos A, et al. Factors which determine the hydrogeochemical behaviour of karstic springs: A case study from the Betic Cordilleras, Spain[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16(9): 1179−1192.

[9] 冯海波, 董少刚, 张涛, 等. 典型草原露天煤矿区地下水环境演化机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 163−172. [Feng Haibo, Dong Shaogang, Zhang Tao, et al. Evolution mechanism of a groundwater system in the opencast coalmine area in the typical prairie[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46(1): 163−172.]

[10] 赵华, 马金珠, 朱高峰, 等. 甘肃省民勤盆地地下水环境变化及原因探讨[J]. 干旱区研究, 2004, 21(3): 210−214. [Zhao Hua, Ma Jinzhu, Zhu Gaofeng, et al. Study on the change of the groundwater environment and its causes in the Minqin Basin, Gansu Province [J]. Arid Zone Research, 2004, 21(3): 210−214.]

[11] 王珺瑜, 王家乐, 靳孟贵. 济南泉域岩溶水水化学特征及其成因[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 821−831. [Wang Junyu, Wang Jiale, Jin Menggui. Hydrochemical characteristics and formation causes of Karst water in Jinan spring catchment[J]. Journal of Earth Science, 2017, 42(5): 821−831.]

[12] 赵芹珍, 蔡继清. 太原市晋祠泉域生态环境特征分析[J]. 山西水利科技, 2012(4): 69−71. [Zhao Qinzhen, Cai Jiqing. Analysis on the characteristic of ecological environment of Jinci spring area in Taiyuan[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2012(4): 69−71.]

[13] 梁永平, 张发旺, 申豪勇, 等. 山西太原晋祠—兰村泉水复流的岩溶水文地质条件新认识[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 11−18, 34. [Liang Yongping, Zhang Fawang, Shen Haoyong, et al. Recognition of the critical hydrogeological conditions of the Jinci spring and Lancun spring in Shanxi[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46(1): 11−18, 34.]

[14] 郭永彬, 周伦, 高旭波. 娘子关泉岩溶地下水水化学特征分析[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(2): 64-67, 71. [Guo Yongbing, Zhou Lun, Gao Xubo. Hydrogeochemistry of Karst groundwater system in Niangziguan spring[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(2): 64-67, 71.]

[15] Yasaman Rafighdoust, Yoram Eckstein, Reza Moussavi Harami, et al. Isotopic analysis, hydrogeochemistry and geothermometry of Tang-Bijar oilfield springs, Zagros region, Iran[J]. Geothermics, 2015, 55: 24-30.

[16] 李会亚, 冯起, 陈丽娟, 等. 民勤绿洲灌区地下水水化学特征及其演化驱动机理[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 733-740. [Li Huiya, Feng Qi, Chen Lijuan, et al. Hydrochemical characteristics and evolution mechanism of groundwater in the Minqin Oasis[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 733-740.]

[17] Makoba E, Muzuka A N N. Water quality and hydrogeochemical characteristics of groundwater around Mt. Meru, Northern Tanzania [J]. Applied Water Science, 2019, 9(5): 1-29.

[18] Harkness Jennifer S, Swana Kelley, Eymold William K, et al. Pre-drill groundwater geochemistry in the Karoo Basin, South Africa [J]. Groundwater, 2018, 56(2): 187-203.

[19] Kouadra Riad, Demdoum Abdeslam, Chabour Nabil, et al. The use of hydrogeochemical analyses and multivariate statistics for the characterization of thermal springs in the Constantine area, North-eastern Algeria[J]. Acta Geochimica, 2019, 38(2): 292-306.

[20] Kim A Baublys, Stephanie K Hamilton, Harald Hofmann, et al. A strontium ($^{87}Sr/^{86}Sr$) isotopic study on the chemical evolution andmigration of groundwaters in a low-rank coal seam gas reservoir (Surat Basin, Australia)[J]. Applied Geochemistry, 2019, 101: 1-18.

[21] 冯海波, 董少刚, 史晓珑, 等. 内蒙古托克托县潜水与承压水中氟化物的空间分布特征及形成机理[J]. 现代地质, 2016, 30(3): 672-679. [Feng Haibo, Dong Shaogang, Shi Xiaolong, et al. The spatial distribution and its formed mechanism of fluoride in the unconfined and confined groundwater of Tuoketuo County, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2016, 30(3): 672-679.]

[22] Dong Shaogang, Liu Baiwei, Shi Xiaolong, et al. The spatial distribution and hydrogeological controls of fluoride in the confined and unconfined groundwater of Tuoketuo County, Hohhot, Inner Mongolia, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(1): 325-335.

[23] Seung-Gu Lee, Tong-Kwon Kim, Tae Jong Lee. Strontium isotope geochemistry and its geochemical implication from hot spring waters in South Korea[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2011, 208(1): 12-22.

[24] Ivanova I S , Bragin I V , Chelnokov G A , et al. Geological-hydrogeochemical characteristics of a "silver spring" water source (the Lozovy ridge)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, 33(1): 012005.

[25] 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 等. 滦河流域中上游富锶地下水成因类型与形成机制[J]. 地球学报, 2020, 41(1): 65-79. [Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Gan Fengwei, et al. Genetic type and formation mechanism of strontium-rich groundwater in the upper and middle reaches of Luanhe River Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(1): 65-79.]

[26] 李政葵, 董少刚, 张涛, 等. 内蒙古托克托县地区浅层地下水氟化物与土壤水溶性氟的相关性研究[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1351-1358. [Li Zhengkui, Dong Shaogang, Zhang Tao, et al. Correlation between fluoride in shallow groundwater and water-soluble fluoride in soil in Tuoketuo County, Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1351-1358.]

[27] 刘晓波, 董少刚, 刘白薇, 等. 内蒙古土默川平原地下水水文地球化学特征及其成因[J]. 地球学报, 2017, 38 (6): 919-929. [Liu Xiaobo, Dong Shaogang, Liu Baiwei, et al. Hydrogeoehemical characteristics and genesis of groundwater in the Tumochuan plain of Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38 (6): 919-929.]

[28] 管超, 刘丹, 周炎广, 等. 库布齐沙漠水沙景观的历史演变[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 395-402. [Guan Chao, Liu Dan, Zhou Yanguang, et al. Historical evolution of the fluvial and aeolian landscapes in the Hobq Desert[J]. Arid Zone Research, 2017, 34 (2): 395-402.]

[29] 刘震, 姚星, 胡晓丹, 等. 鄂尔多斯盆地中生界断层的发现及其对成藏的意义[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(2): 56-66. [Liu Zhen, Yao Xing, Hu Xiaodan, et al. Discovery of the mesozoic fault and its implication on the hydrocarbon accumulation in Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35 (2): 56-66.]

Hydrogeochemical characteristics and origin of “Shenquan” in Tuoketuo County, Inner Mongolia

WANG Lei, DONG Shao-gang, WANG Xue-xin, WANG Chao, LI Zheng-kui

(*School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Key Laboratory of river and lake ecology in Inner Mongolia, Hohhot* 010021, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: The groundwater in Tuoketuo County, Inner Mongolia, is generally high in F^- and salt, most of which are not suitable for long-term drinking. However, “Shenquan, ” located in the southwest of the county, has become the main source of water for the local people because of its excellent water quality. In order to explore the source of “Shenquan” water and the reason why it is different from the surrounding groundwater in chemical characteristics, based on the collection of hydrogeological data, field survey, and sampling analysis, this paper uses the Piper trilinear diagram, Durov diagram, analysis of groundwater flow system, and other methods to make comparatively analyze the spring and surrounding groundwater and trace the source of “Shenquan. ” The results show that (1) although “Shenquan” is located in the discharge area of an alluvial-lacustrine plain in Tuoketuo county and close to the Yellow River, there are essential differences between “Shenquan” water (HCO_3-Ca) with low F^- and high Sr and Yellow River water (Cl- Na) and surrounding groundwater (high F^- and high TDS). (2) “Shenquan” water has no apparent hydraulic connection with the water of the Yellow River and the surrounding groundwater. It is mainly formed by the groundwater in the Kubuqi desert area through the fault on the north edge of Ordos and through the fault channel under the silt of the Yellow river bed. It belongs to a typical fault spring.

Keywords: Shenquan; fault; groundwater; hydrogeochemistry; Tuoketuo County; Inner Mongolia